

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Кафедра електропостачання

**С. П. Денисюк, Д. Г. Дерев'янка**

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

**до виконання домашньої контрольної роботи**

**кредитного модуля «Силова електроніка в системах електропостачання»**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою  
«Системи забезпечення споживачів електричною енергією»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Рецензент *О.В. Данілін*, канд. техн. наук, доц. кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами

Відповідальний редактор *Федосенко М.М.*, канд. техн. наук, доц. кафедри електропостачання

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 14 від 27.06.2018 р.) за поданням Вченої ради ІЕЕ (протокол № 7 від 27.12.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Денисюк Сергій Петрович*, докт. техн. наук, проф.  
*Дерев'янка Денис Григорович*, канд. техн. наук, ст. викладач

## **СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

### **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ДОМАШНЬОЇ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ**

Методичні рекомендації до виконання домашньої контрольної роботи кредитного модуля «Силова електроніка в системах електропостачання» [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» / С. П. Денисюк, Д. Г. Дерев'янка, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 27 с.

У представленому посібнику викладено основні положення щодо виконання домашньої контрольної роботи, тематика якої обіймає розділи курсу «Силова електроніка в системах електропостачання». Навчальне видання до виконання домашньої контрольної роботи містить основні теоретичні відомості, хід виконання роботи, вказівки для її виконання, зміст роботи та вихідні дані для розрахунків.

Навчальне видання призначене для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією».

© С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка, 2019  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ДКР.....	6
2. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ТА ПРОЦЕСІВ ЇЇ РОБОТИ .....	7
3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА.....	11
4. РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ КОМУТАЦІЇ ВИПРЯМЛЯЧА.....	13
5. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРЯМЛЯЧІВ .....	19
6. ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ.....	25
ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ДКР .....	26
ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО АРКУША .....	27

## ВСТУП

В даний час перетворювальна техніка є областю, що швидко розвивається в силовій електроніці. Сучасний рівень досягнення в цій галузі істотно впливає на технічний розвиток більшості галузей народного господарства. Цей рівень досягнення розвитку силової енергетики ґрунтується на досить швидких темпах розвитку сучасних силових напівпровідникових приладів і мікропроцесорної електронної техніки їх управління.

Одним з основних напрямків використання силової електроніки є електропривод. Для електроприводу постійного струму розроблені випрямні перетворюючі агрегати, які широко застосовуються в різних галузях промисловості і транспорту.

Навчальний матеріал в цих методичних вказівках представлений з метою придбання студентами навичок проведення самостійного розрахунку параметрів однофазного випрямляча та проведення аналізу електромагнітних процесів його роботи.

Перед виконанням розрахунків за завданнями студент повинен вивчити відповідні розділи теорії випрямлячів за рекомендованою літературі [1, 2].

У розрахунковій частині проекту студент повинен виконати наступне:

- *вибір силової схеми однофазного випрямляча, обґрунтування та опис її роботи;*
- *розрахунок параметрів для процесів комутації струмів вентилів випрямляча;*
- *розрахунок основних параметрів трансформатора;*
- *розрахунок і побудова характеристик випрямляча;*
- *розрахунок кількості вентилів в плечі випрямляча;*
- *розрахунок умов охолодження та параметрів радіатора (охолоджувача) вентилів;*
- *розрахунок індуктивності ланцюга випрямленого струму;*

- розрахунок умов нормального функціонування випрямляча при максимально обраному значенні кута управління  $\alpha_{max}$ ;
- розробку функціональної схеми системи управління тиристорами випрямляча.

У графічній частині проекту студент повинен представити силову схему випрямляча та блокову функціональну схему його управління, а також, тимчасові діаграми електромагнітних процесів роботи випрямляча та графіки його характеристик. Для успішного виконання домашньої контрольної роботи, крім рекомендованої літератури, в кінці посібника наведено питання для підготовки до виконання та захисту роботи.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ДКР

Самостійне виконання розрахунків за завданнями ДКР є важливим етапом у професійній підготовці фахівця з силової електроніки й електроприводу.

Пояснювальна записка повинна містити математичний висновок розрахункових формул і докладний хід виконання розрахунків за ними для випрямляча, обґрунтування обраних і розрахованих параметрів, ескізи та зведені дані розрахунку його елементів.

У кожному розділі роботи необхідно зробити запис вихідних даних і привести розрахункові формули з їх виведенням, які повинні бути обґрунтовані короткими коментарями.

У всіх розрахунках підстановка числових значень в остаточну формулу є обов'язковою. Після їх виконання записується відповідь з зазначенням одиниць виміру.

Проводити розрахунки з точністю до двох знаків після коми.

У серії однотипних розрахунків перший розрахунок повинен бути виконаний повністю, а результати інших треба звести в таблицю.

Всі розрахунки та побудову графіків залежностей відповідних параметрів виконувати тільки на комп'ютері з оформленням, відповідним вимогам стандарту.

Графічна частина роботи повинна бути виконана на аркушах формату А4. А графіки повинні мати координатну сітку із зазначенням відповідних параметрів і їх розмірностей. Розподіл на осях бажано вибирати з ряду  $1 \cdot 10^n$ ,  $2 \cdot 10^n$  або  $5 \cdot 10^n$ , де  $n$  - будь-яке ціле число.

## 2. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ТА ПРОЦЕСІВ ЇЇ РОБОТИ

У перетворювальній техніці електроприводу є кілька схем однофазних випрямлячів, виконаних на силових напівпровідникових приладах: однонапівперіодна, двонапівперіодна з нульовою точкою, двонапівперіодна мостова схема. Всі ці схеми можуть бути виконані на некерованих (діодах), на керованих (тиристорах і транзисторах) і в комбінації керованих і некерованих приладів (діоди, тиристори, транзистори).

Найкращою схемою однофазного випрямляча є несиметрична мостова схема керованого випрямляча, в якій два поперечних плеча моста виконані на некерованих вентилях (діодах), а два інших - на керованих вентилях (тиристорах). Ця схема має також підвищений коефіцієнт потужності, кращу регульовальну характеристику і більш просту схему управління тиристорами випрямляча [1, 2].

На Рис.2.1 представлена силова схема випрямляча, а на Рис.2.2 - часова діаграма процесів його роботи.

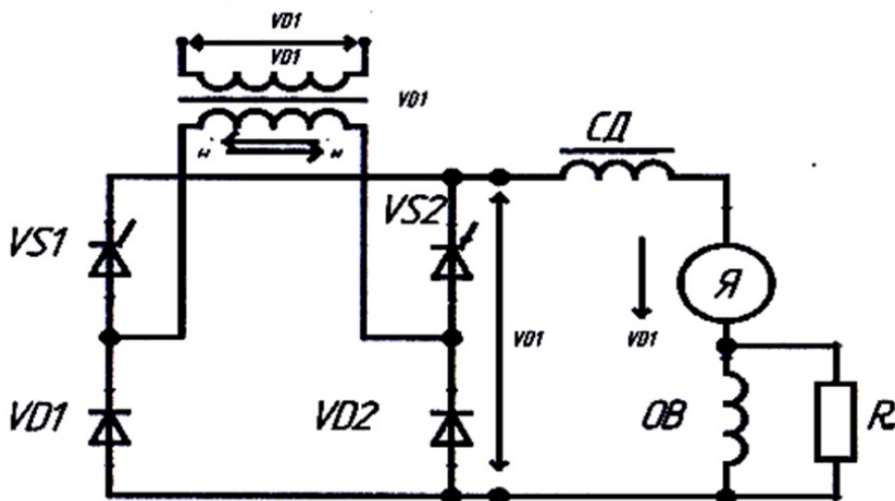


Рисунок. 2.1 – Силовая схема випрямляча

Напряга мережі змінного струму підводиться до первинної обмотки трансформатора, вторинна обмотка якого підключена до випрямляча (Рис. 2.1). Від випрямляча живиться двигун постійного струму, підключений до його виходу через згладжувальний дросель (СД). Обмотки якоря (Я) і збудження (ОВ) двигуна

включені між собою послідовно, для стійкої роботи двигуна в режимі його комутації паралельно обмотці збудження включено постійний опір шунтуючого резистора  $R_m$ . В даній схемі випрямляча реалізується фазовий спосіб регулювання випрямленої напруги на двигуні за рахунок зміни кута відмикання  $\alpha$  тиристорів. Збільшуючи або зменшуючи кут  $\alpha$ , можна зменшувати або збільшувати середнє значення  $U_d$  випрямленої напруги випрямляча. Найбільше значення  $U_d$  буде при  $\alpha = 0$  і рівне нулю при  $\alpha = 180^\circ$ .

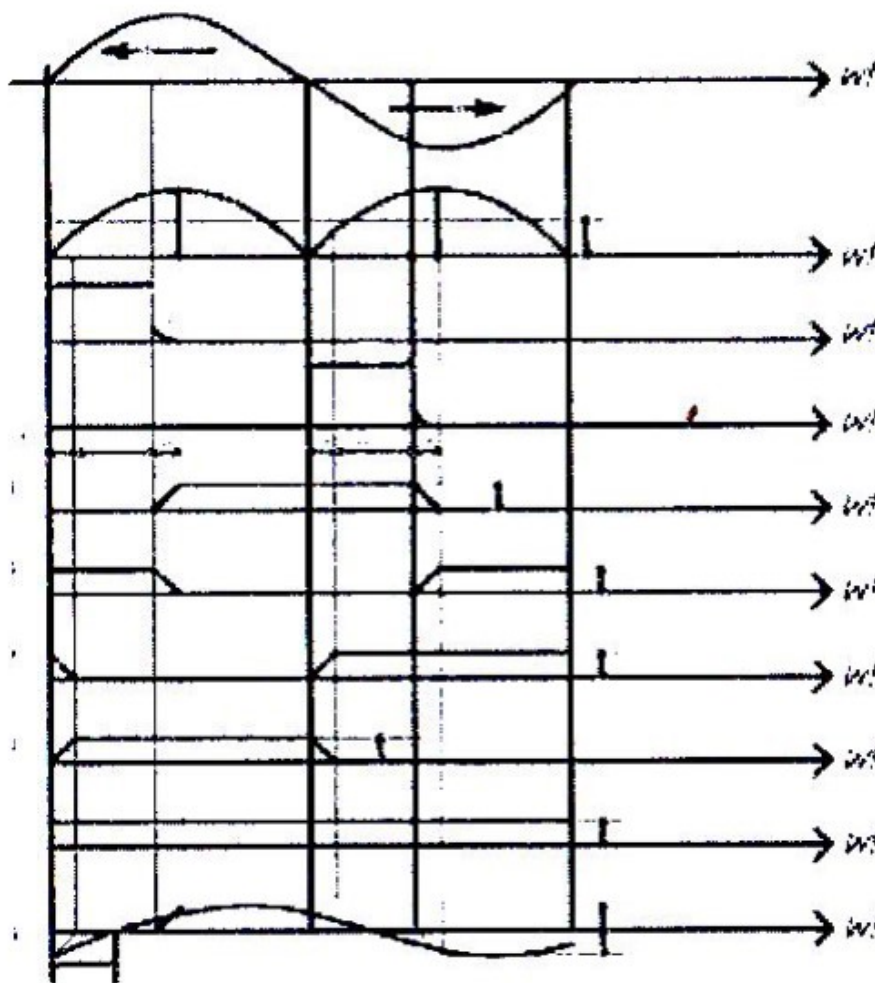


Рисунок. 2.2 – Діаграма процесів роботи випрямляча

Розглянемо роботу випрямляча на інтервалі часу двох напівперіодів напруги мережі (рис. 2.2). У перший напівперіод напруги мережі, при якому ЕРС вторинної обмотки трансформатора  $e_2 = E_{2m} \sin \omega t$  має полярність, позначену на Рис. 2.1 у напрямку стрілкою «справа наліво», випрямлений струм навантаження  $i_d$  протікає через тиристор VS1 і діод VD2. Зміна полярності напруги вторинної



обмотки трансформатора в момент  $\pi$  на зворотне (напрямок стрілки - зліва направо) призводить, на початку другого напівперіоду до комутації струму з діода VD2 в діод VD1. У результаті струм через діод VD2 зменшується від величини  $I$  до нуля, а через діод VD1 збільшується від нуля до величини  $I_d$ .

У період мережевої комутації (комутація називається мережевою тому, що відбувається на початку напівперіодів при зміні полярності напруги мережі) діодів VD1 і VD2 протягом тривалості кута комутації, випрямлена напруга  $U_d$  дорівнює нулю. Напруга рівна нулю, так як вторинна обмотка трансформатора знаходиться у замкненому стані за допомогою відкритих діодів VD1 і VD2, які створюють рівні потенціали обох її кінців, тобто  $U_d = 0$ .

Одночасно в період комутації  $\gamma_1$  виникає буферний контур розрядонакопичувальної електромагнітної енергії в індуктивності ланцюга випрямленого струму (згладжувальний дросель (СД) та обмотки (Я) і (ОВ) двигуна постійного струму (Д)). Струм розряду накопиченої енергії протікає через раніше відкритий тиристор VS1 і відмикається діод VD1 під дією ЕРС самоіндукції, що виникає в індуктивностях (СД) і (Д). Цей розрядний струм використовується в двигуні, так як збільшує середню величину струму  $I_d$  на інтервалі комутації та зменшує його пульсацію.

Якби цього буферного контуру не було (в разі, коли замість діодів VD1 і VD2 були б тиристири), то накопичена енергія в ланцюзі випрямленого струму розряджалася б у вторинну обмотку трансформатора (тобто в мережу), через працюючі з попереднього півперіоду тиристири. Такий режим роботи збільшує реактивну і зменшує активну складові повної потужності, що забирається випрямлячем з мережі для роботи двигуна. В результаті чого коефіцієнт потужності випрямляча знижується.

Після закінчення комутації  $\gamma_1$ , напруга  $U_d$  продовжує бути рівна нулю до моменту повного відкриття тиристора VS2 в другому напівперіоді напруги мережі. Передача енергії від мережі через трансформатор до двигуна поновлюється при відкритті тиристора VS2 в момент, який визначається кутом

відмикання  $\alpha$ . У цей момент починається друга комутація  $\gamma_2$ , коли в тиристорі VS2 струм збільшується від нуля до величини  $i_d$ , а в тиристорі VS1 струм зменшується від величини  $I_d$  до нуля. Після завершення процесу другої комутації струм в двигуні протікає через тиристор VS2 і діод VD1 під впливом напруги вторинної обмотки трансформатора.

У наступному (першому) напівперіоді напруги мережі у випрямлячі почнуть протікати процеси, аналогічні розглянутим процесам в другому напівперіоді. Буферний контур розряду енергії ланцюга випрямленого струму в першому напівперіоді буде створюватися вже через вентилі VS2 і VD2.

### 3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА

До основних параметрів трансформатора відносяться: коефіцієнт трансформації, діючі значення напруги і струму первинної і вторинної обмоток трансформатора, а також типова (розрахункова) потужність трансформатора.

Коефіцієнт трансформації трансформатора визначається за такими виразами:

$$k_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.1)$$

При розрахунку  $k_T$  без великої частки помилки можна прийняти, що ЕРС первинної обмотки трансформатора  $E_1$  дорівнює напрузі живлення мережі  $U_1$ , заданого у вихідних даних, тобто  $E_1 = U_1$ . Отже, для розрахунку  $k_T$  залишається визначити  $E_2$ , яка лежить в основі розрахунку середнього значення випрямленої напруги  $U_d$  випрямляча,

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_p + \gamma_2}^{\pi} E_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{x_T} [1 + \cos(\alpha_p + \gamma_2)] \quad (3.2)$$

Значення  $E_{2m}$  визначаємо з умов роботи випрямляча в номінальному режимі, тобто коли  $U_d = U_{dн}$  та  $i_d = i_{dн}$ . Значення  $U_{dн}$  відомо з вихідних даних завдання.

На основі формул (3.8) та (4.1) отримуємо наступний вираз:

$$U_d = U_{dн} = \frac{E_{2m}}{\pi} \left( 1 + \cos \alpha_p - \frac{u_k}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.3)$$

Звідси

$$E_{2m} = \frac{\pi U_{dн}}{1 + \cos \alpha_p - \frac{u_k}{\sqrt{2}}} \quad (3.4)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

Таким чином, отримуємо

$$k_T = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.6)$$

Так як,  $E_1 \approx U_1$ , то

$$k_T = \frac{U_1}{E_2} \quad (3.7)$$

Розрахунок діючих значень струмів первинної та вторинної обмоток трансформатора виконуємо за наступними виразами:

$$I_2 = I_{dH} \sqrt{\frac{\pi - \alpha_p}{\alpha_p}} \text{ та } I_{1H} = \frac{I_{2H}}{k_T} \quad (3.8)$$

Розрахунок типової потужності трансформатора в номінальному режимі виконуємо за формулою:

$$S_1 = U_1 \cdot I_{1H} \quad (3.9)$$

За величиною типової потужності можна обрати відповідний тип однофазного трансформатора.

#### 4. РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ КОМУТАЦІЇ ВИПРЯМЛЯЧА

У несиметричному випрямлячі відбувається два процеси комутації:

- 1) мережева комутація некерованих вентилів-діодів на початку кожного напівперіоду напруги мережі;
- 2) регульована (фазова) комутація керованих вентилів-тиристорів в межах кожного напівперіоду напруги мережі.

Мережева комутація відбувається при зміні полярності напруги мережі на інтервалі кута  $\gamma_1$ , коли зміна полярності напруги вторинної обмотки трансформатора призводить до можливості відкриття діодів VD1 і VD2 (в залежності від номера напівперіоду) і закриття відповідно VD2 або VD1. На інтервалі кута  $\gamma_1$  струм  $I_2$  у вторинній обмотці трансформатора (цей струм є одночасно і струмом комутації  $I_k$  тобто  $I_2 = I_k$ ) зменшується від величини  $I_2$  до нуля внаслідок замикання діода VD2 в одному напівперіоді або діода VD1 в іншому напівперіоді.

Процес зменшення струму  $I_2$  від  $I_d$  до нуля у вторинній обмотці трансформатора не може відбуватися миттєво, так як трансформатор володіє індуктивністю  $L_T$ , що виникає в його вторинній обмотці ЕРС самоіндукції затримує процес спадання струму  $I_2$  на кут комутації  $\gamma_1$ , величину якого можна визначити з умови, що в інтервалі цієї комутації буде дотримуватися рівність:

$$e_T = -L_T \frac{di_2}{dt} = -\omega L_T \frac{di_2}{d\omega t};$$
$$U_2 = e_L + e_2 = 0.$$

Звідси

$$-\omega L_T \frac{di_2}{d\omega t} + E_{2m} \sin \omega t = 0, \quad (4.1)$$

де  $E_{2m}$  - амплітудне значення ЕРС вторинної обмотки трансформатора, В;

$\omega$  - кутова частота,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$\omega L_T = X_T$  - індуктивний опір обмоток трансформатора.

Із виразу (4.1) можна вивести наступне рівняння:

$$i_2 = i_k = \int_0^{\omega t} \frac{E_{2m}}{X_T} \sin \omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{X_T} (1 - \cos \omega t), \quad (4.2)$$

де  $\frac{E_{2m}}{X_T}$  - амплітудне значення струму вторинної обмотки трансформатора.

На інтервалі мережевий комутації  $\gamma_1$  струм комутації  $I_d$  збігається (наприклад, для першого напівперіоду стрілка «справа наліво») з напрямком струму вентиля VD1. Він спрямований зустрічно струму  $i_d$ , що проходить через вентиль VD2. В іншому напівперіоді вентиля міняються місцями. У загальному вигляді вирази струмів  $i_{VD1}$  і  $i_{VD2}$  в процесі комутації можна записати як  $i_{VD1} = i_k$  (наростаючий струм) і як  $i_{VD1} = i_d - i_k$  (спадаючий струм). Мережева комутація  $\gamma_1$  закінчується при зменшенні струму через вентиль VD2 до нуля, тобто коли

$$i_{VD2} = i_d - i_k = 0$$

Звідси, підставляючи рівняння (4.2) в вираз струму  $i_{VD2}$  за умови  $\omega t = \gamma_1$ , отримаємо

$$i_d - i_k = i_d - \frac{E_{2m}}{X_T} (1 - \cos \gamma_1) = 0.$$

Цей вислів дозволяє отримати наступну формулу:

$$\cos \gamma_1 = 1 - \frac{I_{dH} X_T}{E_{2m}}. \quad (4.3)$$

Індуктивний опір трансформатора  $X_T$  визначаємо з дослідів його короткого замикання

$$X_T = 1 - \frac{U_k E_{2m}}{I_{dH} \sqrt{2}}. \quad (4.4)$$

Підставивши вираз (4.4) в (4.3), отримаємо

$$\cos \gamma_1 = 1 - \frac{U_k I_d}{I_{dH}}. \quad (4.5)$$

В інтервалі регульованою комутації від  $\omega t = \lambda_p$  до  $\omega t = \lambda_p + \gamma_2$  керованих вентилів-тиристорів напруга вторинної обмотки трансформатора  $U_2$  також дорівнює нулю, як і під час мережевої комутації діодів, так як обмотка замкнута накоротко тиристорами, що знаходяться у відкритому стані під час цієї комутації, тобто

$$U_2 = e_1 + e_2 = 0.$$

Аналогічно процесу мережевий комутації отримаємо вираз струму комутації до  $i_k$  :

$$i_2 = i_k = \int_{\lambda_p}^{\lambda_p + \omega t} \frac{E_{2m}}{x_T} \sin \omega t d\omega t = \frac{E_{2m}}{x_T} [\cos \lambda_p - \cos(\lambda_p + \omega t)]. \quad (4.6)$$

Регульована комутація  $\gamma_1$  закінчується при зменшенні струму через VS1 до нуля, тобто коли  $i_{VS1} = I_d - i_k = 0$ . Отже,

$$i_d - i_k = i_d - \frac{E_{2m}}{x_T} [\cos \lambda_p - \cos(\lambda_p + \omega t)].$$

Підставивши в цей вираз формулу (4.4), отримаємо

$$\cos(\lambda_p + \omega t) = \cos \lambda_p - \frac{u_k I_d}{I_{dH} \sqrt{2}} \quad (4.7)$$

При  $\omega t = \gamma_2$  вираз (4.7) буде мати вигляд

$$\cos(\lambda_p + \gamma_2) = \cos \lambda_p - \frac{u_k I_d}{I_{dH} \sqrt{2}} \quad (4.8)$$

Підставляючи задані значення  $\lambda_p, u_k, I_{dH}$  і приймаючи  $I_d = I_{dH}$  для номінального режиму навантаження, обчислимо кути комутації  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  :

$$\gamma_1 = \arccos \left( 1 - \frac{u_k}{\sqrt{2}} \right),$$

$$\gamma_1 = \arccos \left( \cos \lambda_p - \frac{u_k}{\sqrt{2}} \right) - \lambda_p.$$

Виконаємо розрахунок і побудову кривих струмів  $i_{VD1}$  і  $i_{VD2}$ , що протікають через некеровані вентиля VD1 і VD2 під час мережевої комутації (кут  $\gamma_1$ ). Згідно виразу (4.2) для наростаючого струму через VD1, запишемо

$$i_{VD1} = i_k = \frac{E_{2m}}{x_T} (1 - \cos \omega t).$$

Тоді для спадаючого струму через VD2 запишемо

$$i_{VD2} = i_d - i_k = i_d - \frac{E_{2m}}{x_T} (1 - \cos \omega t).$$

Підставляючи в ці формули значення  $X_T$  і вираз (4.4), отримаємо

$$i_{VD1} = \frac{I_{dH} \sqrt{2}}{u_k} (1 - \cos \omega t),$$

$$i_{VD2} = i_d - \frac{I_{dH} \sqrt{2}}{u_k} (1 - \cos \omega t).$$

Для побудови кривих струму  $i_{VD1}$  і  $i_{VD2}$  необхідно задатися десятьма значеннями кута  $\gamma_{1(n)}$ , де  $n = 0, 1, 2, \dots, 10$  в діапазоні від  $\omega t = 0$  до  $\omega t = \gamma_1$ , тобто

$\Delta\gamma_1 = \frac{\gamma_1}{10}$ . Результати розрахунку звести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 - Струми діодів VD1 і VD2 під час мережевої комутації

$\omega t$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_1 = \gamma_1$
$i_{VD1}$										
$i_{VD2}$										

За даними таблиці 4.1 необхідно побудувати тимчасову діаграму струмів  $i_{VD1}$  і  $i_{VD2}$  (рис. 4.1).



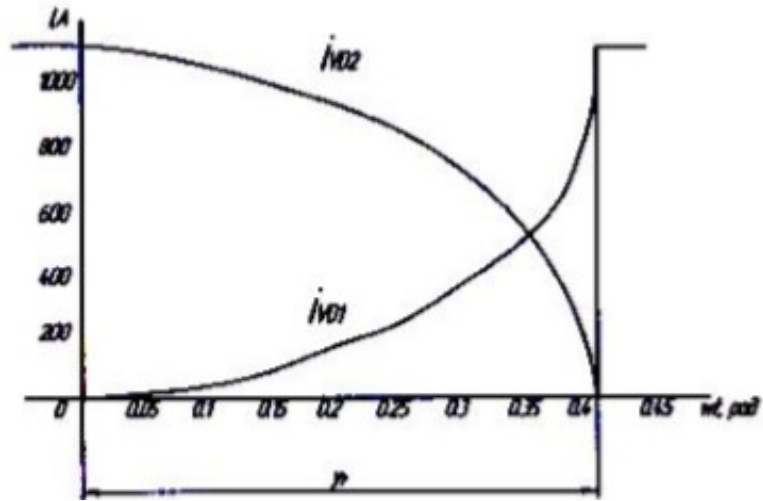


Рисунок 4.1 - Часова діаграма струмів діодів VD1 і VD2 під час мережевої комутації

Розрахунок і побудова кривих струмів  $i_{VS1}$  і  $i_{VS2}$ , що протікають через керуючі вентиля-тиристори VS1 і VS2 під час регульованою комутації, виконаємо аналогічно кривим струмів  $i_{VD1}$  і  $i_{VD2}$ . Згідно виразу (4.6) в номінальному режимі при  $i_d = i_{dH}$  і з урахуванням (3.4) для наростаючого струму через VS2 запишемо

$$i_{VS2} = i_k = \frac{I_{dH} \sqrt{2}}{u_k} [\cos \lambda_p - \cos(\lambda_p + \omega t)].$$

Тоді для спадаючого струму через VS1 запишемо

$$i_{VS1} = i_d - i_k = I_d - \frac{I_{dH} \sqrt{2}}{u_k} [\cos \lambda_p - \cos(\lambda_p + \omega t)].$$

Для побудови кривих струму  $i_{VS1}$  і  $i_{VS2}$  необхідно задатися десятьма значеннями кута  $\gamma_{2(n)} = n \cdot \Delta\gamma_2$ , де  $n = 0, 1, 2, \dots, 10$  в діапазоні від  $\omega t = \lambda_p$  до  $\omega t = \lambda_p + \gamma_2$ , тобто  $\Delta\gamma_2 = \frac{\gamma_2}{10}$ . Результати розрахунку звести в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Струми діодів VD1 і VD2 під час мережевої комутації  $\gamma_2$

$\lambda_p + \Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 2\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 3\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 4\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 5\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 6\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 7\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 8\Delta\gamma_2$	$\lambda_p + 9\Delta\gamma_2$

За даними таблиці 3.2 необхідно побудувати тимчасову діаграму струмів  $i_{VS1}$  і  $i_{VS2}$  (рис. 4.2).

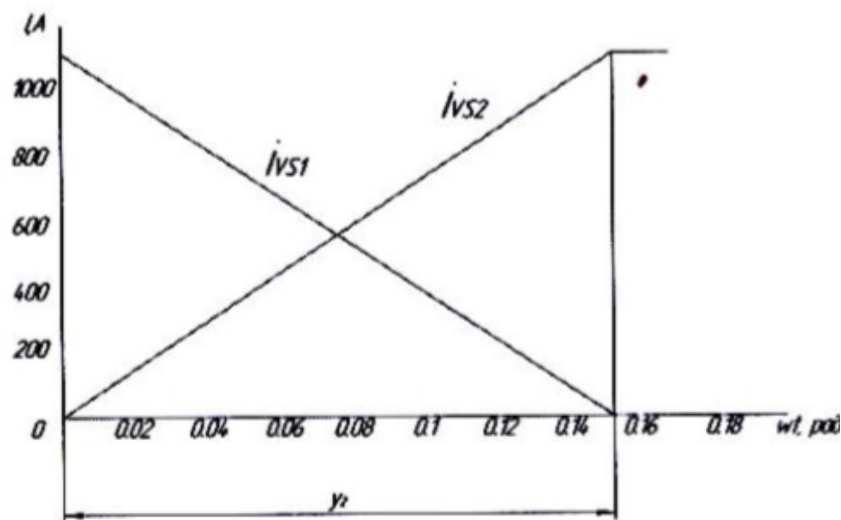


Рисунок 4.2 - Часова діаграма струмів тиристорів VS1 і VS2 під час регульованою комутації

Аналіз кривих струмів тиристорів VS1 і VS2 показує, що комутація струмів цих тиристорів протікає практично прямолінійно (порівняйте з мережевою комутацією діодів VD1 і VD2).

## 5. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРЯМЛЯЧІВ

### 5.1 Зовнішні характеристики

Зовнішньої характеристикою випрямляча називається залежність середнього значення випрямленої напруги  $U_d$  від середнього значення струму навантаження  $I_d$  при постійному куті регулювання  $\lambda$ . Цю залежність з урахуванням (3.8) і (4.1) виражають наступною формулою:

$$U_d = \frac{E_{2m}}{\pi} \left( 1 + \cos \lambda - \frac{u_k I_d}{I_{dH} \sqrt{2}} \right). \quad (5.1)$$

У проекті необхідно побудувати чотири характеристики: при  $\lambda = 0$ ,  $\lambda = \gamma_1$ ,  $\lambda = \lambda_{pзad}$  і  $\lambda = 1,4\lambda_{pзad}$ .

Вираз (5.1) є рівнянням прямої лінії, тому для побудови кожної характеристики досить розрахувати дві точки:  $I_d = 0$  (холостий хід) і  $I_d = I_{dH}$  (режим номінального навантаження). Результати розрахунку слід звести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 - Зовнішні характеристики випрямляча

Кут регулювання $\lambda_p$ , рад	Випрямлена напруга $U_d$ , В	
	При $I_d = 0$ (холостий хід)	При $I_d = I_{dH}$ (режим номінального навантаження)
$\lambda = 0$ ,		
$\lambda = \gamma_1$ ,		
$\lambda = \lambda_{pзad}$		
$\lambda = 1,4\lambda_{pзad}$		

Зовнішні характеристики випрямляча при різних значеннях  $d_n$  І наведені на рисунку 5.1.

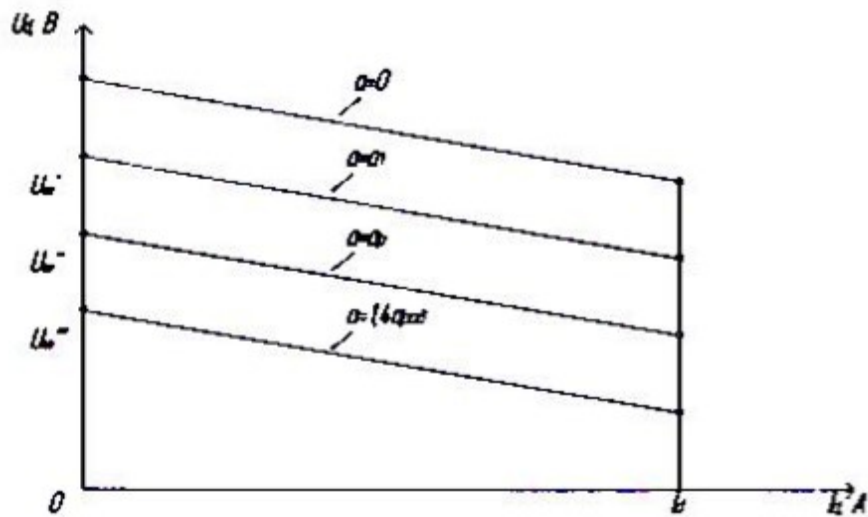


Рисунок 5.1 - Зовнішні характеристики випрямляча при різних значеннях кута  $\lambda_p$

## 5.2 Регулювальні характеристики

Регулювальною характеристикою випрямляча називається залежність середнього значення вихідної (випрямленої) напруги  $U_d$  від кута регулювання  $\lambda$ . Регулювальні характеристики можуть розраховуватися для різних видів навантаження (активного, активно-індуктивного, активно-ємкісного).

Розрахунок регулювальної характеристики здійснюється за формулою (5.1) для двох значень струму навантаження  $I_d = 0$  (холостий хід) і  $I_d = I_{dH}$  (режим номінального навантаження). Значення  $\lambda_p$  для розрахунку  $U_d$  задається в діапазоні від 0 до  $\pi$  через 0,523 рад (30 °) для семи значень: 0; 0,523; 1,046; 1,569; 2,093; 2,616; 3,14. Результати розрахунку необхідно звести в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 - Регулювальні характеристики випрямляча

Кут регулювання $\lambda_p$ , рад		0	0,523	1,046	1,569	2,093	2,616	3,14
$U_d$ , В	$I_d = 0$							
	$I_d = I_{dH}$							

За даними таблиці 5.2 будуються регульовані характеристики випрямляча, які представлені на рисунку 5.2.

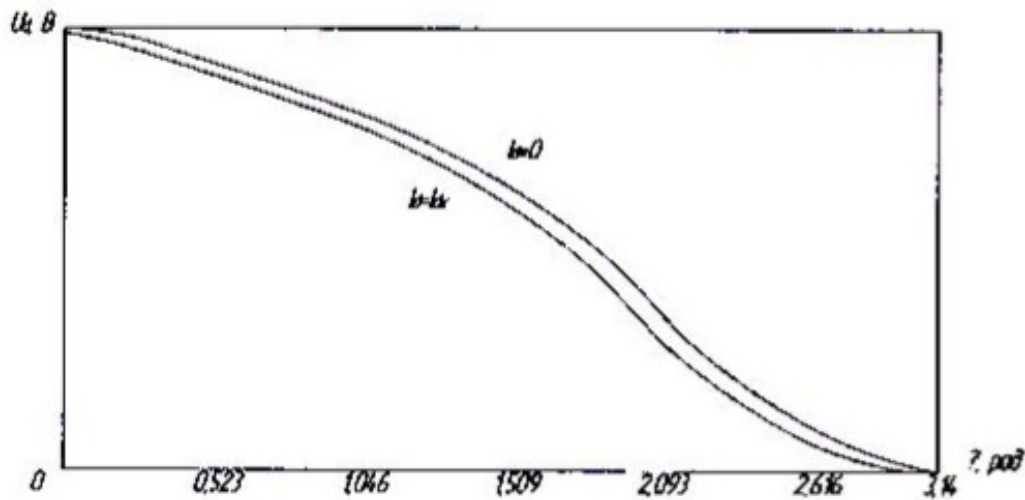


Рисунок 5.2 – Регульовані характеристики випрямляча

### 5.3 Енергетичні характеристики (коефіцієнт потужності і корисної дії)

Коефіцієнт потужності випрямляча  $K_M$  визначається як відношення активної потужності первинної обмотки трансформатора  $P$  до його повної потужності  $S$

$$K_M = \frac{P}{S}.$$

Коефіцієнт  $K$  є одним із основних параметрів випрямляча, визначаючим економічні показники системи перетворення змінного струму в постійний струм.

При наявності синусоїдальної форми живлячої напруги мережі активна потужність рівна

$$P = I_{1(1)} U_1 \cos \varphi,$$

де  $I_{1(1)}$  - діюче значення першої гармонічної складової струму первинної обмотки трансформатора;

$U_1$  - діюче значення напруги живлення випрямляча;

$\varphi$  - кут зсуву фаз між  $I_{1(1)}$  і  $U_1$ .

Повна потужність первинної обмотки трансформатора

$$S = I_1 \cdot U_1.$$

Звідси видно, що

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{I_{1(l)} U_1 \cos \varphi}{I_1 U_1} = \frac{I_{1(l)}}{I_1} \cos \varphi = \nu \cos \varphi, \quad (5.2)$$

де  $\frac{I_{1(l)}}{I_1} = \nu$  - коефіцієнт спотворення струму первинної обмотки трансформатора.

Кут зсуву фаз  $\varphi$  залежить від кутів  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$

$$\varphi = \frac{\lambda}{2} + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{4}. \quad (5.3)$$

З врахуванням розкладання кривої струму прямокутної форми в ряд Фур'є отримаємо його вираз

$$I_{1(l)} = 0,9 \frac{I_d}{k_T} \cos \frac{\lambda}{2}. \quad (5.4)$$

Діюче значення струму  $I_1$  прямокутної форми

$$I_1 = \frac{I_d}{k_T} \sqrt{\frac{\pi - \lambda}{\pi}}. \quad (5.5)$$

В результаті отримаємо вираз коефіцієнт спотворення струму

$$\nu = \frac{I_{1(l)}}{I_1} = \frac{0,9 I_d \cos \frac{\lambda}{2} k_T}{I_d k_T \sqrt{\frac{\pi - \lambda}{\pi}}} = \frac{0,9 \cos \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\frac{\pi - \lambda}{\pi}}} \quad (5.6)$$

Таким чином, коефіцієнт потужності  $K_M$  буде рівний

$$K_M = \frac{0,9 \cos \frac{\lambda}{2}}{\sqrt{\frac{\pi - \lambda}{\pi}}} \left( \frac{\lambda}{2} + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{4} \right). \quad (5.7)$$

Значення  $\lambda$  для розрахунку  $K_M$  при отриманих значеннях  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  в номінальному режимі задається в діапазоні від 0 до  $\pi$  через 0,523 рад (30 °) для семи значень: 0; 0,523; 1,046; 1,569; 2,093; 2,616; 3,14. Результати розрахунку необхідно звести в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Коефіцієнт потужності випрямляча

$\lambda$ , рад	0	0,523	1,046	1,569	2,093	2,616	3,14
$K_M$							

По даним таблиці 5.3 будується крива  $K_M = f(\lambda)$  коефіцієнта потужності (рис 5.3)

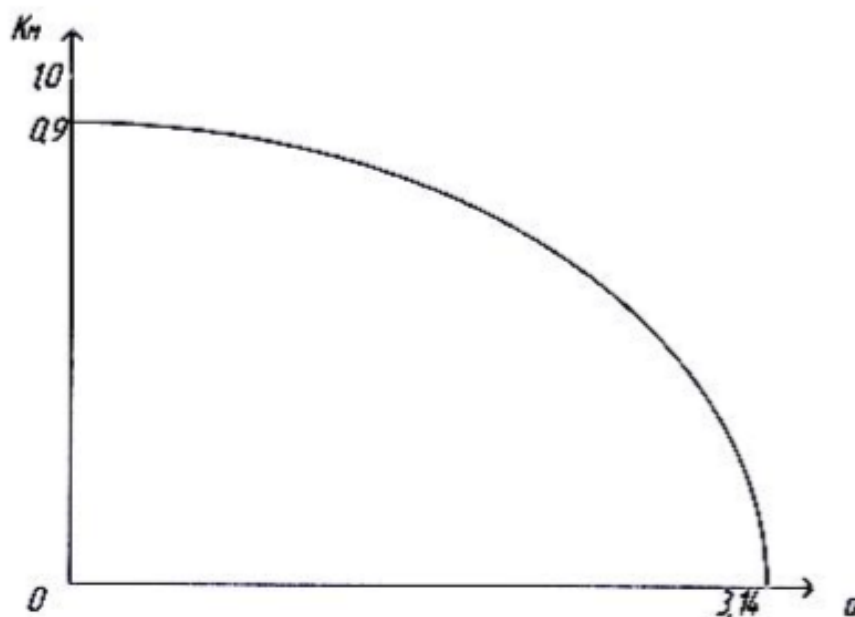


Рисунок 5.3 – Характеристика коефіцієнта потужності

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  випрямляча визначається як відношення активної корисної потужності випрямляча з врахуванням втрат потужності в вентилях до активної корисної потужності випрямлячі без врахування втрат потужності на вентилях випрямляча.

Так як струм навантаження протікає в кожний напівперіод напруги через одне тиристорне і одне діодне плече моста, то вихідна напруга випрямляча буде менше розрахованої напруги випрямляча по формулі (5.7) на суму падінь напруги в цих плечах. В результаті

$$\eta = \frac{P - \Delta P}{P} = \frac{U_d I_d - \sum \Delta U_{\text{вент}} I_d}{U_d I_d} = \frac{I_d (U_d - \sum \Delta U_{\text{вент}})}{U_d I_d} =$$

$$= \frac{U_d - (\Delta U_{\text{діод}} n_{\text{посл}} + \Delta U_{\text{тир}} n_{\text{посл}})}{U_d},$$

де  $\sum \Delta U_{\text{вент}}$  - сума падінь напруги в вентилях (діодах і тиристорах) випрямляча. Падіння напруги в середньому на силовому діоді  $\Delta U_{\text{діод}} = 1,5B$ , а на силовому тиристорі  $\Delta U_{\text{тир}} = 20B$ . Загальна сума падінь напруги на вентилях випрямляча розраховується для двох послідовно включених пліч випрямляча в кожному напівперіоді напруги з врахуванням кількості  $n_{\text{посл}}$  послідовно включених вентилів в кожному плечі. Число  $n_{\text{посл}}$  розраховується для одного плеча випрямляча виходячи з напруги вторинної обмотки трансформатора, приходящого на плече, і класу вентиля (див. в завданні до домашньої контрольної роботи). В результаті:

$$\sum \Delta U_{\text{вент}} = \Delta U_{\text{діод}} n_{\text{посл}} + \Delta U_{\text{тир}} n_{\text{посл}}.$$

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  розраховується для номінального навантаження  $I_d = I_{dH}$  при  $\lambda = \gamma_1$ .



## 6. ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

В даному розділі наведені варіанти завдань для виконання ДКР з дисципліни «Силовa електроніка в системах електропостачання». Вихідні дані вибираються відповідно до двох останніх цифр шифру залікової книжки студента. При цьому дані з першої таблиці вибираються згідно передостанній цифрі шифру, а дані з другої таблиці відповідно до другої цифри шифру.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані, що обираються згідно з передостанньою цифрою шифру.

Номер варіанту	$U_{1н}, B$	$U_{дн}, B$	$I_{дн}, A$	$U_K, \%$
0	380	187	5,5	5
1	220	108	3,2	4,5
2	220	94	2,4	4,5
3	380	108	6,2	5,5
4	660	323	4,8	6
5	127	37	5	5
6	660	108	7,6	4,5
7	380	94	7,1	4,5
8	127	94	2,5	5
9	220	37	5,8	5

Таблиця 6.2 - Вихідні дані, що обираються згідно з останньою цифрою шифру.

Номер варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кут регулювання $\alpha_p$ , град.	20	20	15	25	15	30	25	30	20	15

## **ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ДКР**

**Шрифт:** 14 пт, Times New Roman;

**міжрядковий інтервал:** 1,5 рядка;

**поля:** 2 см з усіх сторін, **абзац:** відступ 1,25 см.

Усі рисунки підписуються по центру по формі:

Рисунок X – Назва рисунка

Усі таблиці підписують з лівого краю по формі:

Таблиця X – Назва таблиці

### **Вимоги до змісту ДКР**

1 сторінка – Титульний аркуш (приклад представлено нижче);

2 та подальші сторінки згідно з послідовністю виконання ДКР.

### **Теоретична частина**

В кожному розділі необхідно привести короткі теоретичні відомості по кожному розділу ДКР з повним виведенням розрахункових формул. Об'єм, строго кажучи, не регламентовано. В якості джерел інформації для теоретичної частини можна використовувати будь-які джерела, наприклад, лекції з дисципліни, друковані та електронні підручники, мережу Інтернет.

## **ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО АРКУША**

Міністерство освіти і науки України  
НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського  
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра електропостачання

### **Домашня контрольна робота**

З дисципліни: «Силова електроніка в системах  
електропостачання»

Виконав:  
студент 3-го курсу  
групи ОЕ-51, ІЕЕ  
Прізвище І.П.  
Перевірив:  
Дерев'янка Д.Г.

Київ – 2018